

М. С. Варфоломеев^{1*}, В. С. Моисеев¹, Г. И. Щербакова²

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва

²Государственный научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений, г. Москва

**varfolom2a@rambler.ru*

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT5Л

В работе приведены результаты исследований влияния высокотермостойкой керамической формы на дефекты поверхности литых изделий из титановых сплавов. Использование литейных форм, термохимически устойчивых к титановым сплавам в условиях их высокотемпературной заливки в вакууме, сводит к минимуму физико-химическое взаимодействие металла с формой и существенно снижает трудноудаляемый газонасыщенный слой на изделиях, повышая тем самым их служебные свойства.

Ключевые слова: титановый сплав VT5Л, качество поверхности, альфированный слой, керамическая форма, алюмоиттриевое связующее.

M. S. Varfolomeev, V. S. Moiseev, G. I. Shherbakova

IMPROVING OF SURFACE LAYER QUALITY OF CAST PRODUCTS FROM TITANIUM ALLOY VT5L

The work presents the results of investigations into the effect of a highly heat-resistant ceramic mold on surface defects of cast products from titanium alloys. Use of foundry molds that are thermochemically resistant to titanium alloys under the conditions of their high-temperature pouring in vacuum minimizes the physicochemical interaction and significantly reduces the hard-to-remove gas-saturated (alphized) layer on products, thereby enhancing their service properties.

Keywords: titanium alloys, surface quality, alphized layer, ceramic foundry mold, alumo-yttrium binder.

Титановые сплавы широко используются для производства деталей в авиационной и ракетно-космической технике, судостроении и транспортном машиностроении, энергетической и химической промышленности, медицине, где особенно важную роль играет биологическая инертность по отношению к живому организму [1–3].

Тенденции современного производства к повышению качества, точности и эксплуатационной надежности литых изделий, особенно

деталей ответственного назначения из титановых сплавов (сложных фасонных отливок), получаемых методом литья по выплавляемым моделям, предъявляют особые требования к качеству литейным форм.

Литье титановых сплавов в формы, получаемые по выплавляемым моделям, применяют в основном для сложных по конфигурации и тонкостенных отливок. Однако получение литых изделий из титановых сплавов сопряжено с определенными технологическими трудностями. В процессе заливки и охлаждения происходит физико-химическое взаимодействие расплава с газами, выделяющимися из керамической формы, а также при непосредственном контакте с ее материалом. В результате в отливке образуется загрязненный поверхностный слой с повышенным содержанием примесей внедрения (кислород, азот, углерод). В процессе эксплуатации изделия газонасыщенный (альфированный) слой может привести к зарождению и распространению трещины, что значительно снижает его эксплуатационную надежность. Кроме того, он значительно повышает поверхностную твердость, что приводит к появлению больших сложностей при механической обработке титановых отливок. В связи с этим толщина альфированного слоя должна быть изначально учтена при проектировании отливки с последующим удалением химическим фрезерованием [3].

Получение качественных отливок, без поверхностных дефектов, возможно повышением термохимической стойкости литейных форм путем выбора более инертных по отношению к титановому сплаву исходных связующих и огнеупорных материалов, исключающих термохимический контакт расплава с материалом формы [4–9].

Применяемые в технологии литья по выплавляемым моделям керамические корундовые формы, содержащие SiO_2 , обладают рядом существенных недостатков, связанных с тем, что при их изготовлении используют в качестве связующих этилсиликат или коллоидальный кремнезем.

Перспективным путем повышения качества поверхностного слоя титановых отливок является создание термохимически устойчивых керамических форм [4–9].

Целью данной работы является повышение качества поверхностного слоя литых изделий из титановых сплавов за счет уменьшения трудноудаляемого альфированного слоя путем замены при изготовлении керамических форм традиционных связующих материалов (этилсиликат, кремнезоль) на связующие алюмоиттриевого состава [10]. Такая керамическая форма создает химически инертный защитный слой с отрицательной энергией Гиббса по отношению к TiO_2 .

Выбор огнеупорных и связующих материалов для изготовления керамических форм производился исходя из стандартного изменения свободной энергии образования оксидов. Все огнеупорные материалы,

входящие в керамическую форму и используемые для литья титановых сплавов, должны быть термохимически устойчивы к воздействию расплава в условиях высокотемпературной заливки в вакууме.

Широко используемый в прецизионном литье в качестве огнеупора электрокорунд ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) по отношению к оксиду титана обладает отрицательным значением свободной энергии Гиббса. Химически наименее прочным огнеупором является диоксид кремния, поэтому используемые связующие материалы на кремнеземной основе (этилсиликаты, кремнезоли) являются одной из главных причин возникновения поверхностных дефектов на литых титановых изделиях. Наиболее химически устойчивым огнеупором при температуре заливки расплавом 1650–1750°C является оксид иттрия. Однако ввиду того, что керамическая форма одноразовая, использовать при ее изготовлении в качестве огнеупорного наполнителя и обсыпочногo материала дорогостоящий оксид иттрия нецелесообразно. Поэтому в качестве замены используемых в промышленности кремнеземных связующих в настоящей работе предлагается алюмоиттриевое связующее [10]. В процессе высокотемпературного прокаливания керамической формы удаляются все органические составляющие и алюмоиттриевое связующее спекает зерна корунда, образуя смесь оксидов $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ и Y_2O_3 . Высокая стабильность используемых оксидов при температурах заливки уменьшает вероятность передать свой кислород титану.

По традиционной технологии литья по выплавляемым моделям были изготовлены опытные керамические формы путем послойного нанесения на модельный блок керамической суспензии, состоящей из связующего и наполнителя (пылевидного электрокорунда), с последующей обсыпкой каждого слоя зернистым электрокорундом. Для первых двух защитных слоев использовали алюмоиттриевое связующее и электрокорунд, а последующие слои изготавливали с использованием этилсиликатного связующего и электрокорунда.

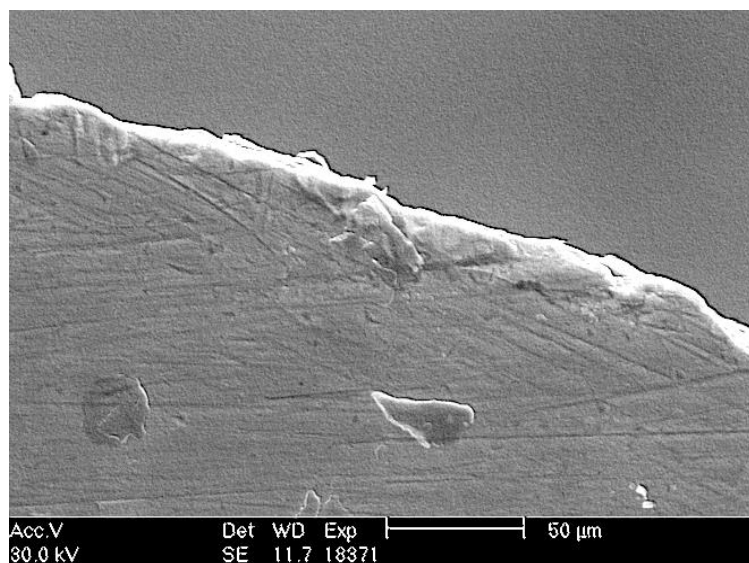
Прокалку многослойных керамических опытных форм проводили в электропечи сопротивления при температуре 1300 °C и выдержкой при этой температуре в течение 3 ч. Заливку керамических корундовых форм осуществляли титановым сплавом ВТ5Л (Ti – 4,1–6,2 % Al) центробежным способом в вакуумной дуговой гарнисажной печи с расходуемым электродом.

Альфированный слой на поверхности отливок определяли методом замера микротвердости на косом шлифе с помощью микротвердомера.

Металлографические исследования шлифов опытных отливок выполняли на растровом электронном микроскопе *Philips XL30 ESEM*, оснащенный энергодисперсионным детектором *Sapphire* с Si(Li) кристаллом и ультратонким окном толщиной 1,3 мкм.

При изучении торца титановой отливки оказалось, что глубина альфированного слоя не превышает 15 мкм. Количественный элементный анализ соответствует химическому составу заливаемого титанового сплава BT5Л (Ti – 4,1–6,2 % Al) (см. рисунок).

Исследования распределения микротвердости по сечению титановой отливки показали, что на поверхности литых образцов отмечается альфированный слой с микротвердостью 320–330 кг/мм², а микротвердость в сердцевине образца 210–230 кг/мм².



Elem	Wt %	At %
AlK	6.22	10.53
TiK	93.78	89.47
Total	100.00	100.00

Микрофотография и данные количественного анализа шлифа
поверхностного слоя (торец) титановой отливки

Таким образом, применение керамических термостойких форм с защитными лицевыми слоями при получении литых изделий из титановых сплавов позволяет значительно снизить глубину альфированного слоя, однако не гарантирует полностью его исключения на поверхности отливки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения базовой части государственного задания (код проекта 3087).

ЛИТЕРАТУРА

1. Titanium alloys for aerospace applications / M. Peters [et al.] // Advanced engineering materials. 2003. Vol. 5. № 6. P. 419–427.
2. Отливки из интерметаллидных титановых сплавов / Б.А. Кулаков [и др.] // Вестник ЮУрГУ. Сер. Metallurgy. 2013. Т. 13, № 1. С. 51–55.
3. Братухин А. Г., Бибииков Е. Л., Глазунов С. Г. Производство фасонных отливок из титановых сплавов. М. : Metallurgy, 1998. С. 224.

4. Choi B.-J., Lee S., Kim Y. J. Influence of TiO_2 on alpha case reaction of Al_2O_3 mould in Ti investment casting // Materials science and technology. 2013. Vol. 29. № 12. P. 1453–1462.
5. Sung S. Y., Kim Y. J. Alpha-case formation mechanism on titanium investment castings // Materials Science and Engineering A. 2005. Vol. 405. P. 173–177.
6. Kim M. G., Kim Y. J. Effect of mold material and binder on metal-mold interfacial reaction for investment castings of titanium alloys // Materials Transactions. 2002. Vol. 43, № 4. P. 745–750.
7. Kim M. G., Kim Y. J. Investigation of interface reaction between TiAl alloys and mold materials // Metals and Materials International. 2002. Vol. 8, № 3. P. 289–293.
8. Optimization of ceramic shells for contact with reactive alloys / P. Teresa Duarte [et al.] // Materials Science Forum. 2008. Vol. 587–588. P. 157.
9. Characterization of zirconia-based slurries with different binders for titanium investment casting / E. Zhao [et al.] // China Foundry. 2012. Vol. 9, № 2. P. 125.
10. High-refractory ceramics based on alumina-yttria binders / M. S. Varfolomeev [et al.] // Inorganic Materials. 2015. Vol. 51, № 7. P. 722–727.